

УДК 621.313.33:62-83-52

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО НАГРУЖЕНИЯ РЕЗЕРВНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

**М. Н. ПОГУЛЯЕВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Предложена схема устройства нагружения резервных синхронных электрогенераторов, выполненного с использованием статических преобразователей. Показано, что такое устройство в отличие от известных является энергосберегающим и позволяет регулировать коэффициент мощности и величину нагрузки генератора. Численным моделированием установлены диапазоны регулирования коэффициента мощности (0,5–0,9) и уровня нагрузки 10–110 % от номинальной мощности электрогенератора.*

**Ключевые слова:** устройство нагружения, резервный электрогенератор, управляемый выпрямитель, ведомый инвертор, тиристорный преобразователь.

## ENERGY SAVING DEVICE LOADING OF BACKUP ELECTRIC GENERATORS BASED ON STATIC CONVERTERS

**M. N. POGULYAEV**

*Educational institution “Sukhoi State Technical University  
of Gomel”, the Republic of Belarus*

*The present invention proposes a loading device for backup synchronous electric generators using static converters. It has been shown that such a device, unlike the known ones, is energy-saving and allows adjusting the power factor and the magnitude of the generator load. Numerical modeling sets ranges of power factor control (0.5–0.9) and load level of 10–110 % of rated power of electric generator.*

**Keywords:** loading device, backup electric generator, controlled rectifier, driven inverter, thyristor converter.

### **Введение**

Зависимость современного мира от электроэнергии настолько велика, что даже незначительные перебои с ее обеспечением от систем энергоснабжения могут привести к большим потерям на производстве, выходу из строя технологического оборудования, социальным потрясениям и даже привести к человеческим жертвам. Избежать таких последствий позволяет электропитание наиболее ответственных потребителей от резервных электрогенераторов (РЭГ). Такие генераторы длительно находятся в холодном резерве, и поэтому должны периодически подвергаться испытаниям под нагрузкой с целью определения основных технических характеристик, выявления технических неисправностей и проведения их наладки.

Требования к проведению таких испытаний определяются соответствующими ГОСТами [1] и техническими условиями эксплуатации РЭГ. Испытания проводятся как в установившихся, так и в переходных режимах работы в виде сброса-наброса нагрузки. На практике испытания под нагрузкой в настоящее время проводятся в основном двумя способами [2], [3]:

- нагружение на параллельную работу РЭГ с сетью;
- нагружение РЭГ на специальное нагрузочное устройство.

Прямое подключение генератора к сети хотя и обеспечивает энерго-сберегающий режим работы, но с точки зрения диагностики не всегда эффективно, поскольку в этом случае можно получить только статические  $U$ -образные и угловые характеристики и по ним лишь косвенно оценивать работу систем управления и функционирование элементов резервного электрогенератора. При этом для получения  $U$ -образных характеристик необходимо вмешательство в систему управления генератора и приводного двигателя, что не всегда возможно (многие производители не допускают такое вмешательство). Кроме того, сеть в сравнении с испытуемым генератором является источником большой мощности с постоянными параметрами напряжения и частоты. В этом случае указанные параметры генератора также будут неизменны, что не позволяет оценить качество функционирования систем стабилизации в динамических режимах.

Во втором случае к выходу РЭГ подключается нагрузочное устройство модульного типа с набором резистивных и реактивных элементов, выполненных на определенную мощность. Данные нагрузочные устройства энергозатратны. Вся выработанная в процессе испытания активная энергия преобразуется в тепло на резисторах и рассеивается в окружающем пространстве.

Таким образом, перечисленные способы нагружения РЭГ имеют серьезные недостатки, и в связи с этим актуальной задачей становится поиск новых решений в этом направлении.

Целью работы является разработка энергосберегающего устройства нагружения резервных электрогенераторов на основе статических преобразователей, позволяющего регулировать нагрузку как по величине, так и по характеру.

### **Основная часть**

Резервные электрогенераторные установки построены в основном по схеме: приводной бензиновый или дизельный двигатель внутреннего сгорания, синхронный электрогенератор и система управления. Согласно требованиям стандартов и технических условий устройство нагружения (УН) должно создавать нагрузку в пределах от 10 до 110 % номинальной мощности генератора при номинальном коэффициенте мощности 0,8 [1], а также обеспечивать возможность его регулирования в диапазоне 0,5–0,9. Исходя из данных требований, а также необходимости рекуперации вырабатываемой в процессе испытаний электроэнергии в сеть, предложено устройство нагружения резервных электрогенераторов на основе статических преобразователей (рис. 1). При исследовании и анализе работы нагружающего устройства использовались методы теории электрических цепей, электрических машин, преобразовательной техники, имитационное моделирование.

Устройство нагружения (рис. 1) представляет собой выпрямительно-инверторный агрегат. В его состав входят управляемый выпрямитель, присоединенный к обмоткам статора испытуемого синхронного электрогенератора, ведомый сетью инвертор, подключенный к сети через согласующий трансформатор. Для сглаживания пульсаций напряжения и тока применен сглаживающий фильтр. Управление преобразователями осуществляется системой управления выпрямителем и системой управления ведомым инвертором.

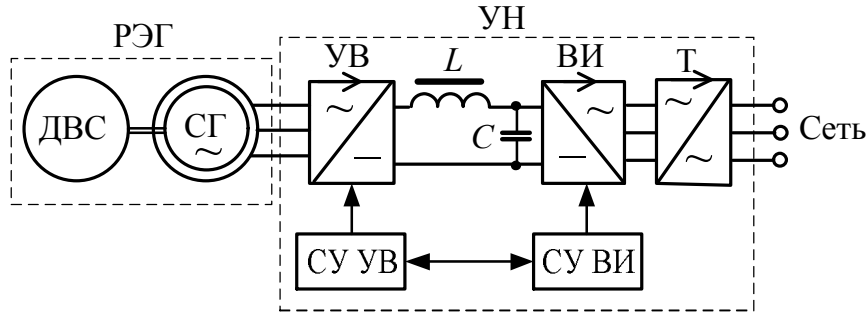


Рис. 1. Функциональная схема устройства нагружения на основе статических преобразователей:

РЭГ – резервный электрогенератор; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; СГ – синхронный генератор; УВ – управляемый выпрямитель; ВИ – ведомый инвертор; LC – сглаживающий фильтр; Т – согласующий трансформатор; СУ УВ – система управления выпрямителем; СУ ВИ – система управления ведомым инвертором

Управляемый выпрямитель и ведомый инвертор представляют собой трехфазные тиристорные преобразователи (ТП), выполненные по мостовым схемам. Главным достоинством тиристорных преобразователей является способность работать с большими токами и напряжениями, выдерживая при этом продолжительную нагрузку и импульсные воздействия.

Управляемый выпрямитель преобразует входное синусоидальное напряжение генератора в регулируемое постоянное, а ведомый инвертор затем вновь преобразует в переменное. Использование ведомого инвертора позволяет передавать энергию из цепи постоянного тока в промышленную сеть, т. е. обеспечить рекуперацию электроэнергии, вырабатываемой генератором в процессе испытаний.

Сглаживающий реактор в цепи постоянного тока преобразователя сглаживает пульсации выпрямленного тока, уменьшает зону прерывистых токов и ограничивает скорость нарастания аварийного тока через тиристоры при коротком замыкании на стороне выпрямленного тока.

Принцип действия устройства нагружения основан на особенностях работы тиристорных преобразователей.

Известно, что в ТП первая гармоника тока  $I_1^{(1)}$  отстает по фазе от напряжения на угол  $\varphi_1$  [4]:

$$\varphi_1 = \alpha_1 + \frac{\gamma_1}{2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – угол управления тиристоров УВ;  $\gamma_1$  – угол коммутации [4]:

$$\gamma_1 = \arccos\left(\cos \alpha_1 - \frac{2X_r I_d}{\sqrt{2}U_r}\right) - \alpha_1, \quad (2)$$

где  $X_r$  – индуктивное сопротивление генератора в режиме коммутации;  $I_d$  – выпрямленный ток;  $U_r$  – выходное линейное напряжение генератора [5]:

$$X_r \approx 0,25(3X_d'' + X_q''),$$

где  $X_d''$ ,  $X_q''$  – сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки статора.

Выходное напряжение генератора системой управления РЭГ, как правило, стабилизируется и поддерживается на уровне номинального значения.

При работе на управляемый выпрямитель коэффициент мощности нагрузки генератора  $K_m$ , согласно формуле (1), будет приблизительно равен:

$$K_m \approx \cos \varphi_1 = \cos \left( \alpha_1 + \frac{\gamma_1}{2} \right). \quad (3)$$

При увеличении угла регулирования  $\alpha_1$  первая гармоническая составляющая тока все более отстает по фазе от напряжения генератора, вследствие чего возрастает размагничивающее действие реакции якоря, что соответствует работе генератора на реальную активно-индуктивную нагрузку.

Ориентировочно, оценим диапазон регулирования коэффициента мощности. При номинальных токах нагрузки угол коммутации обычно не превышает  $18-20^\circ$ , а угол управления для уменьшения пульсаций и содержания высших гармонических составляющих ограничим на уровне  $50^\circ$ . Тогда минимальное значение коэффициента мощности составит:

$$K_{Mmin} \approx \cos \left( \alpha_{1max} + \frac{\gamma}{2} \right) = \cos \left( 50 + \frac{20}{2} \right) = 0,5.$$

Максимальное значение коэффициента мощности при минимальном угле управления  $15^\circ$  будет равно

$$K_{Mmax} \approx \cos \left( \alpha_{1min} + \frac{\gamma}{2} \right) = \cos \left( 15 + \frac{20}{2} \right) = 0,9.$$

Таким образом, изменяя угол управления  $\alpha_1$  первого преобразователя в пределах от  $15$  до  $50^\circ$ , диапазон регулирования коэффициента мощности составит  $0,5-0,9$ .

Принцип регулирования тока нагрузки основан на введении в контур протекания тока источника напряжения, создаваемого ведомым инвертором  $U_{dVI}$ , и действующего встречно выпрямленному напряжению генератора  $U_{dUV}$  (рис. 2).

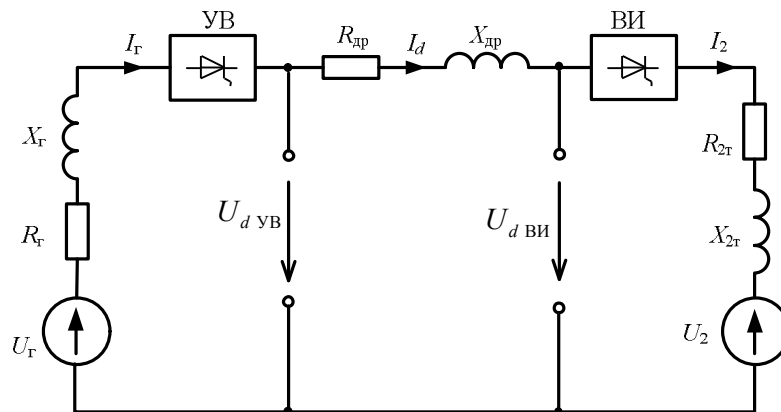


Рис. 2. Схема замещения силовой части энергосберегающего устройства нагружения

Напряжение на выходе управляемого выпрямителя без учета прямого падения напряжения на открытых тиристорах [4]:

$$U_{dУВ} = k_{cx} U_r \cos \alpha_1 - \left( \frac{pX_r}{2\pi} + R_r \right) I_d, \quad (4)$$

где  $k_{cx}$  – схемный коэффициент преобразователя;  $p$  – пульсность преобразователя;  $R_r$  – активное сопротивление обмотки фазы синхронного генератора.

Напряжение, формируемое ведомым инвертором [4]:

$$U_{dВИ} = k_{cx} U_2 \cos \beta_2 + \left( \frac{pX_{2r}}{2\pi} + R_{2r} \right) I_d, \quad (5)$$

где  $\beta_2 = \pi - \alpha_2$  – угол опережения тиристоров ВИ;  $\alpha_2$  – угол управления тиристоров ВИ;  $X_{2r}$ ,  $R_{2r}$  – индуктивное и активное сопротивления трансформатора, приведенные к вторичной стороне.

Среднее значение выпрямленного тока  $I_d$  определяется разностью напряжений  $U_{dУВ} - U_{dВИ}$  и активным сопротивлением дросселя  $R_{др}$  (рис. 2):

$$I_d = \frac{U_{dУВ} - U_{dВИ}}{R_{др}} = \frac{U_{dУВ} - k_{cx2} U_2 \cos \beta_2}{R_{др} + R_{2r} + \frac{pX_{2r}}{2\pi}}. \quad (6)$$

Действующее значение тока генератора  $I_r$  и среднее значение выпрямленного тока  $I_d$  связаны между собой зависимостью

$$I_r = k_l I_d, \quad (7)$$

где  $k_l$  – схемный коэффициент по току. В частности, для трехфазной мостовой схемы [4]:

$$I_r = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d.$$

Уравнения (6) и (7) показывают, что ток нагрузки генератора можно задавать углом опережения  $\beta_2$ . Из выражения (4) видно, что при регулировании коэффициента мощности (угла управления  $\alpha_1$ ) напряжение  $U_{dУВ}$  изменяется, и для поддержания значения тока нагрузки постоянным следует соответствующим образом изменять угол опережения  $\beta_2$  с тем, чтобы разность напряжений в числителе выражения (6) оставалась неизменной. В устройстве нагружения эту функцию выполняет система управления инвертором СУВИ.

При регулировании тока нагрузки, как следует из формулы (2), будет изменяться угол коммутации  $\gamma_1$ , и для поддержания коэффициента мощности неизменным необходимо изменять угол управления  $\alpha_1$ . В УН эту функцию выполняет система управления выпрямителем СУУВ.

Для верификации предложенной схемной реализации УН было применено имитационное моделирование в программной среде Matlab с использованием пакетов расширения SimPowerSystems и Simulink [6]. С помощью имитационной модели (рис. 3) было проведено численное моделирование работы устройства нагружения с трехфазным синхронным генератором с параметрами:  $S_{ном} = 8,1$  кВА;  $U_{ном} = 400$  В;  $\cos \phi_{ном} = 0,8$ ;  $n_{ном} = 1500$  об/мин;  $f_{ном} = 50$  Гц.

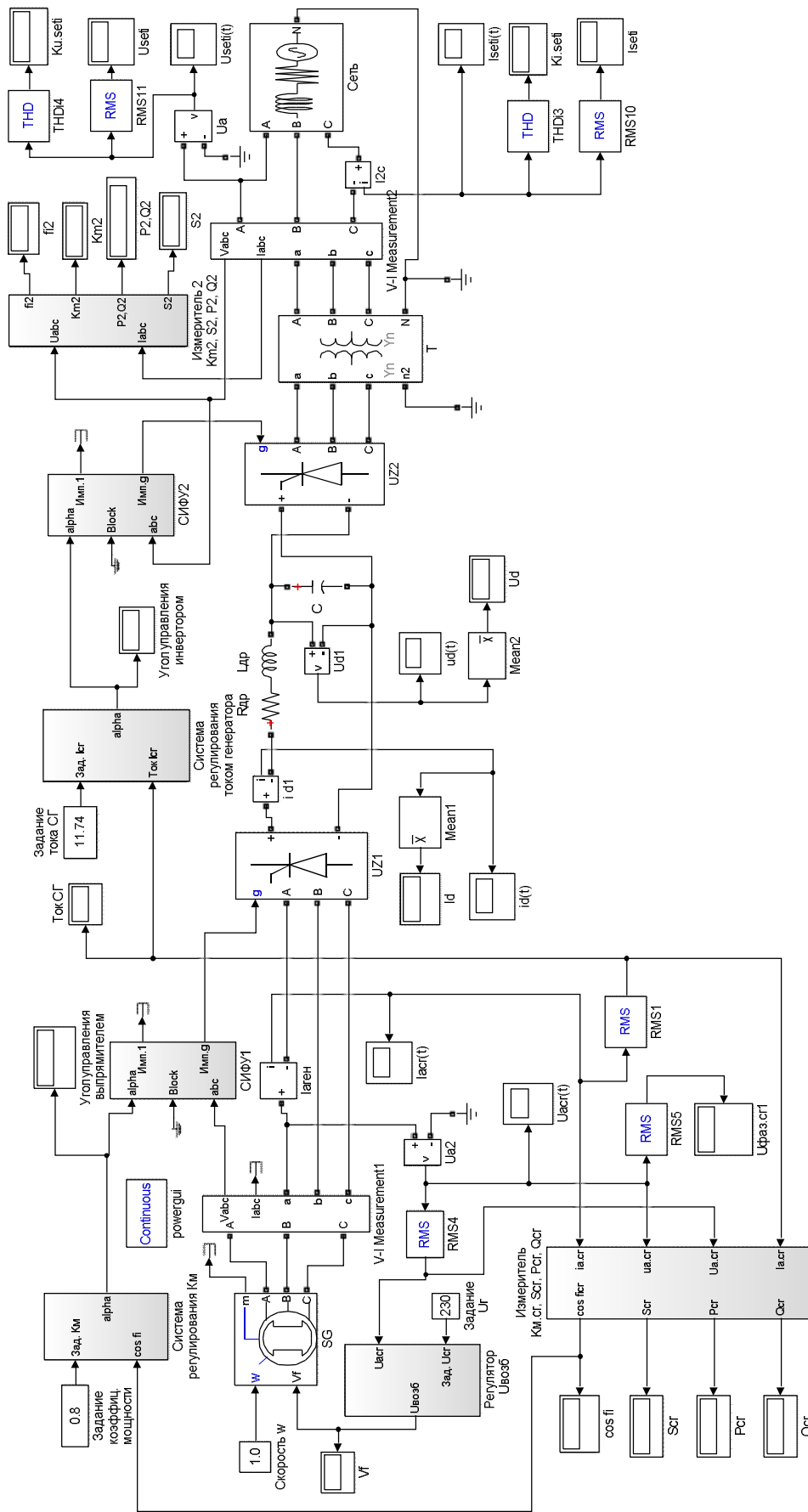


Рис. 3. Имитационная модель устройства нагрузки на тиристорных преобразователях

Представленная имитационная модель позволяет производить исследование статических и динамических режимов работы устройства нагружения, анализировать параметры токов, напряжений, осуществлять визуализацию результатов, снимать и строить необходимые характеристики. В ее состав (рис. 3) входят следующие основные блоки: синхронный генератор SG, полупроводниковые преобразователи UZ1 и UZ2, системы импульсно-фазового управления СИФУ1 и СИФУ2, согласующий трансформатор, системы регулирования коэффициента мощности и тока нагрузки генератора, а также необходимые задающие и измерительные элементы.

Более подробное описание имитационной модели и анализ всех полученных результатов выходят за рамки данной статьи, и будут представлены в последующих работах. Здесь же укажем, что проведенные на модели исследования подтверждают работоспособность предложенной схемной реализации УН. В частности, были получены зависимости коэффициента мощности  $K_m$  от угла управления первым преобразователем и тока нагрузки генератора от угла опережения второго преобразователя. Установлено, что, изменяя угол управления в пределах  $12-60^\circ$ , можно задавать коэффициент мощности в диапазоне  $0,5-0,9$ , а изменяя угол опережения в диапазоне  $20-75^\circ$ , можно задавать ток нагрузки генератора в пределах  $0,1-1,1$  номинального значения. Также мы установили, что при номинальных значениях коэффициента мощности и тока нагрузки в сеть возвращается до 82 % электроэнергии, вырабатываемой генератором в процессе испытаний. Таким образом, численным моделированием подтверждается правильность предварительно сделанных расчетов и выводов.

Единственный недостаток предложенного УН на основе тиристорных преобразователей состоит в том, что его выходной ток имеет практически прямоугольную форму, т. е. является источником высших гармоник. Наличие высших гармоник тока может приводить к искажению питающего синусоидального напряжения. При достаточной мощности сети эти искажения будут незначительными. При соизмеримых мощностях сети и испытуемого генератора для уменьшения влияния высших гармоник требуется применение фильтрокомпенсирующих устройств.

### Заключение

Проведенные исследования устройства нагружения на основе тиристорных преобразователей показали, что его можно успешно применять для испытания резервных электрогенераторов под нагрузкой, также оно позволяет:

- обеспечить номинальный коэффициент мощности генератора, равный  $0,8$ , с возможностью бесступенчатого регулирования в пределах  $0,5-0,9$ ;
- устанавливать ток нагрузки в пределах от  $10$  до  $110$  % номинальной мощности генератора;
- функционировать в энергосберегающем режиме (около  $75-85$  % вырабатываемой в процессе испытаний энергии рекуперируется в сеть);
- проверять работу испытуемого генератора как в статических, так и динамических режимах.

### Литература

1. ГОСТ Р53178–2008. Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Методы испытаний. – Введ. 01.01.10. – М. : Стандартинформ, 2009. – 27 с.
2. Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания дизельных генераторов / М. Н. Погуляев [и др.] // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 4. – С. 106–110.

3. Энергоэффективные испытательные стенды / М. Н. Погуляев [и др.] // Энергоэффективность. – 2018. – № 9. – С. 26–30.
4. Попков, О. З. Основы преобразовательной техники : учеб. пособие для вузов / О. З. Попков. – М. : МЭИ, 2007. – 200 с.
5. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины : учеб. для электротехн. специальностей вузов / Д. Э. Брускин, А. Е. Зохорович, В. С. Хвостов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 528 с.
6. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

*Получено 01.08.2022*